

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Simulation sismique sur centrifugeuse

Seismic centrifuge simulation

A. ZELIKSON, Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

P. LEGUAY, Centre d'Etudes Scientifiques et Techniques d'Aquitaine, CEA, Le Barp, France

SYNOPSIS Les principes d'une simulation correcte en centrifugeuse pour des modèles réduits en dynamique sont présentés ainsi que deux cas particuliers, celui d'une centrale nucléaire et celui d'une plateforme de forage sur pieux pour lesquels on étudie l'interaction sol-fondation-structure.

I - GENERALITES

Un simulateur pour les problèmes de génie parasismique et notamment pour l'interaction (superstructure-fondation-sol) a été mis au point en utilisant la grande centrifugeuse du CESTA. La simulation est basée sur une similitude correcte [1] et les résultats sont présentés ici par leurs valeurs équivalentes in situ, de façon à mettre en évidence tout effet d'échelle. L'indice m est utilisé pour le modèle, l'échelle A_m/A est désignée par A^* . Les sols sont reconstitués pour avoir les mêmes lois de comportement qu'in situ. L'échelle des contraintes et des vitesses matérielles est conservée, car la changer signifierait changer de matériau. L'échelle du temps est égale à l'échelle des longueurs l^* , et les fréquences dans le modèle sont $1/l^*$ plus grandes, ainsi que les accélérations. Si les effets de consolidation sont importants, la perméabilité du sol est réduite (par introduction de fines par exemple) selon l^* , ce qui ramène le temps de consolidation de l^{*2} à l^* . In situ les mouvements sismiques se propagent dans un sol infini, et les vibrations de la structure s'amortissent principalement par radiation à l'infini. Dans le modèle, le sol est placé dans une boîte et le séisme simulé est transmis à travers les parois. Le mouvement peut être contrôlé et l'excitation asservie près de ces parois, mais la répartition du mouvement à l'intérieur, l'acheminement d'énergie et le couplage dépendent de la construction de la maquette. On ne peut pas sous-estimer l'importance d'une étude concernant ces problèmes pour un projet de simulateur. Prenons l'exemple de l'étude du mouvement de deux bâtiments voisins couplés par le sol. La maquette peut être schématisée par un système à deux degrés de liberté : PAROI GAUCHE - RESSORT k - Masse M - RESSORT DE COUPLAGE k - MASSE M - RESSORT k - PAROI DROITE et nous comparons deux méthodes d'excitation : 1. Table vibrante. Comme l'onde se propage plus vite dans le métal de la cellule que dans le sol, cela correspond à une excitation simultanée des parois gauche et droite. Seul le mode symétrique est excité et les deux masses sont en phase. Tout se passe comme si le ressort de couplage k était inexistant ou de rigidité quelconque. Le couplage par le sol est certainement mal représenté. Pour une excitation sinusoïdale les masses vibrent selon $\sin \omega_1 t$ ($\omega_1^2 = k/M$).

2. Excitation par chocs. Une seule paroi est excitée, la gauche par exemple ; ce qui équivaut à une excitation $A/2$ à gauche et à droite, plus une excitation $A/2$ à gauche et $-A/2$ à droite. Cette dernière excite le mode où les masses vibrent en opposition selon ω_2 [$\omega_2^2 = (k + 2k_c)/M$]. Dans le cas d'une excitation sinusoïdale, les masses vibrent selon le battement $\sin 0,5(\omega_1 + \omega_2)t \cos 0,5(\omega_1 - \omega_2)t$. Non seulement le couplage est représenté dans un cas et pas dans l'autre, mais les réponses ont des formes totalement différentes. Mettons un sol continu entre les deux parois. Si les deux parois sont choquées simultanément, alors un signal de compression se propage de la paroi gauche et un signal de traction de la paroi droite. Cette traction est-elle souhaitable ? Les deux signaux interfèrent au centre, donnant une accélération amplifiée. Il est donc préférable d'exciter la paroi gauche sans que la paroi droite soit réfléchissante. Il s'avère que cela est possible, même sans dispositif spécial, à cause des propriétés inélastiques des sols réels, à condition que la cellule soit suffisamment grande.

II - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Pour une centrifugeuse le produit (masse embarquée) X (nombre de g) est limité, et chaque kg non utilisé pour la maquette est une masse parasite très coûteuse. Nous avons choisi une cellule en aluminium de forme allongée (1,30 m sur 0,80 m, profondeur 0,40 m avec $l^* = g^* = 100$) et une excitation par une suite d'explosions programmées dans une chambre de réverbération munie de filtres où les chocs pneumatiques sont transmis au sol par une membrane en caoutchouc fixée à une extrémité de la cellule. Le poids mort est de 250 kg, la masse de la maquette de sol saturé et de la structure est de 750 kg. Les mouvements sont mesurés par des accéléromètres miniatures montés sur des plaques minces qui font antenne et engagent une masse de sol importante par rapport aux capteurs. La mesure des contraintes intergranulaires et de la pression d'eau est faite par des rosettes de capteurs de pression normale miniatures ayant la forme d'un disque plat qui minimise la perturbation. Dans le cas bidimensionnel, cela fait deux accéléromètres, trois capteurs de pression totale et un capteur de pression interstitielle par point de mesure.

Les mouvements du sol en champ libre ont été étudiés à chaque essai par 10 accéléromètres placés à différentes profondeurs. Au laboratoire, des essais de pilonnement ont été faits en laissant chuter une masse sur la surface du sable rigidifié par le vide. Le signal est très court. La figure 1 montre la transmission du signal dans toutes les directions, la localisation des échos près des parois et leurs amplitudes relatives au signal.

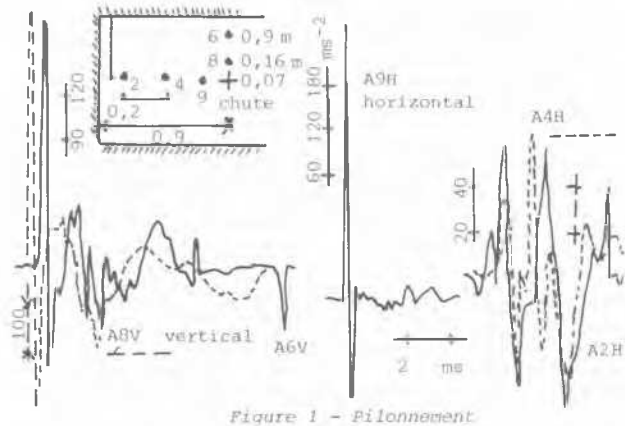


Figure 1 - Pilonnement.

L'atténuation suit la même loi que pour un milieu infini, avec des ondes de pression auprès de la source et de Rayleigh plus loin. Des tirs ont été faits en laboratoire sur un sol rigidifié par une pression d'air appliquée sur une membrane posée sur la surface et surtout en centrifugeuse. Ils sont résumés figure 2. La loi d'atténuation varie selon les ondes de Rayleigh avec une contribution exponentielle de l'amortissement matériel. Les échos sont localisés près de la paroi opposée au tir. Dans la zone sans écho, la structure est placée aussi loin que possible de la source car le signal devient de plus en plus homogène avec la distance de la source. De très nombreux essais ont montré cette homogénéité ainsi que la stabilité du profil en profondeur. Dans la partie utile du modèle une onde de surface passe à travers la cellule (fig. 3). Les échos des parois latérales sont néfastes surtout pour l'atténuation des vibrations de la structure. Les résultats montrent qu'une structure de diamètre 0,25 m est compatible avec les dimensions de la cellule.

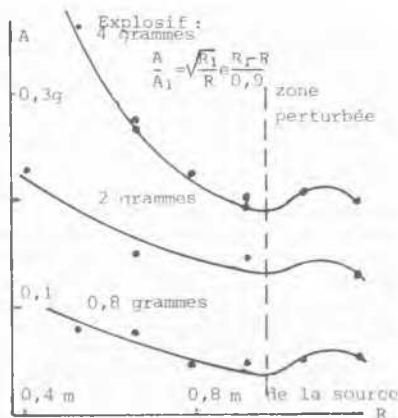


Figure 2 - Amplitudes des mouvements (tirs)

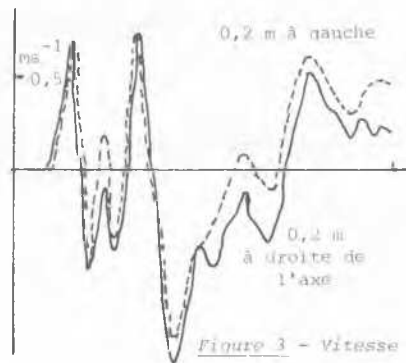


Figure 3 - Vitesse

Nous n'avons pas de signaux en contraintes des séismes réels. Il faut se contenter d'une comparaison avec des accélérogrammes. Selon l'usage, ceci est fait par le calcul de la pseudo-vitesse (spectres de choc). Ce calcul ne donne pas le nombre de secousses, si important pour la liquéfaction et la transmission d'énergie par couplage. Il faut donc compléter par comparaison directe. Une comparaison détaillée est faite en représentation ordinaire (fig. 4). Le nombre de secousses est contrôlé par le nombre d'explosions (jusqu'à dix) dans le simulateur. L'accélération verticale est du même ordre de grandeur que l'accélération horizontale.

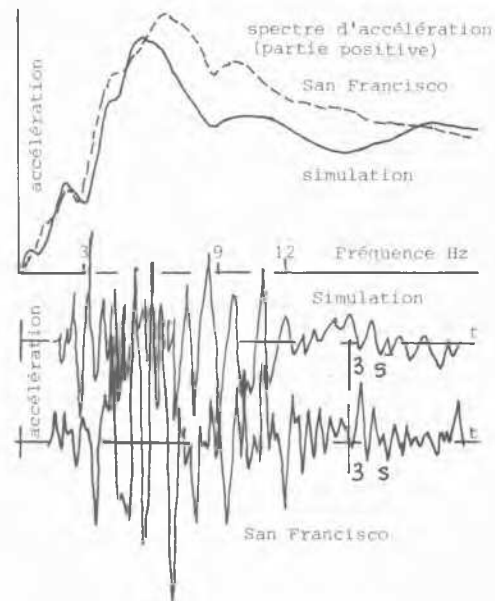


Figure 4 - Comparaisons des enregistrements (tir sur centrifugeuse)

Les contraintes en champ libre doivent être étudiées avec la même attention que le mouvement, surtout quand il s'agit du danger de liquéfaction. Il faut tenir compte des contraintes statiques et de celles dues aux vibrations de la structure. La corrélation entre vitesse et contrainte totale en champ libre est montrée sur la figure 5. La mesure des contraintes statiques est pratiquement impossible à faire in situ. Dans le modèle, elle est faite tout naturellement pendant la montée en accélération de la centrifugeuse (figure 6).

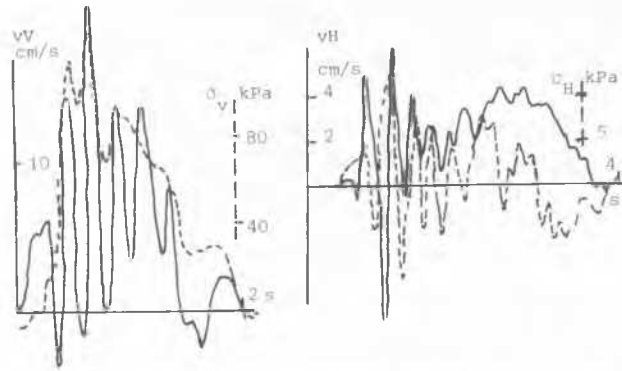


Figure 5 - Vitesses et contraintes totales dynamiques.

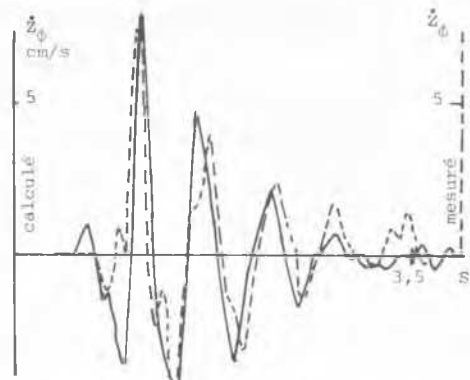


Figure 7 - Validation de calcul.

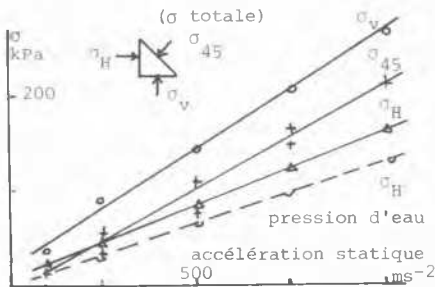


Figure 6 - Contraintes statiques.



Figure 8 - Reaction verticale sur un groupe de pieux.

Pour la liquéfaction, Luong et al. [2] ont montré qu'il faut impérativement suivre les cycles (déviateur-pression moyenne effective), ce qui équivaut à suivre l'évolution des cercles de Mohr en contraintes effectives. Expérimentalement, ceci peut se faire par un mixage analogique.

III - ETUDE DE DEUX CAS PARTICULIERS

1. Une centrale nucléaire réelle, fondée sur radier, a été modélisée en aluminium pour représenter ces modes rigides. Le sol était un sable saturé. Un code de calcul par intégration directe a été établi en prenant comme vitesse des ondes de cisaillement la valeur de 300 ms^{-1} mesurée en centrifugation. Le sol était représenté par un modèle patin-ressort pour chaque mode rigide. Les valeurs numériques de ces composantes ont été tirées des calculs supposant le sol infini. Les rotations de la structure ont été mesurées par la demi-différence des accélérogrammes de paires de capteurs symétriquement fixés qui, après intégration, ont donné la vitesse $Z\phi$ (au bout d'un bras de 0,15 m dans le modèle) comparé au calcul pour le même signal en champ libre en figure 7. Cet excellent résultat montre que les conditions dans le modèle étaient suffisamment proches du cas du sol semi-infini.

2. Une structure simplifiée qui représentait une plate-forme de forage de forme carrée à 3 étages a été modélisée en aluminium. Elle était fondée sur 4 groupes de 4 pieux-tubes dans un sable saturé, type de fondation difficile à calculer. Une analyse modale expérimentale a été faite [3]. Pour cela, il a fallu découper la structure au

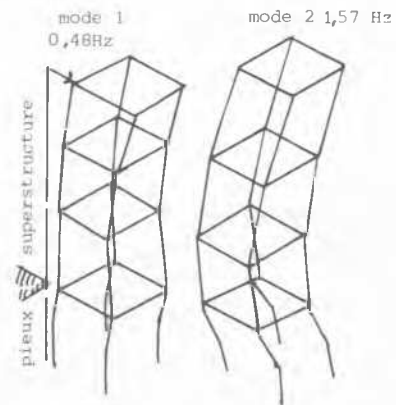


Figure 9a - Tour sur pieux modes propres animés.

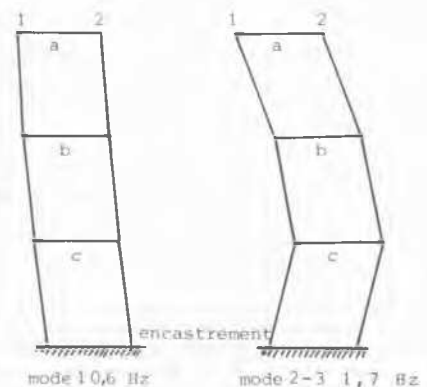


Figure 9b - Modes de la superstructure.

Numéro	Fréquence Hz	Amortissement %	Masse modale K.ton.	Modes horizontaux à base fixe (fig. 9 b.)					
				1 a	2 a	1 b	2 b	1 c	2 c
1	0,59	1,3	0,23	1,00	1,03	0,80	0,82	0,47	0,43
2	1,07	3,4	7,36	1,00	0,87	0,41	0,51	- 0,09	0,00
3	1,98	3,5	0,34	1,00	0,98	- 0,25	- 0,25	- 0,87	- 1,03
4	2,72	4,0	1,15	1,00	0,94	- 0,71	- 0,70	- 0,58	0,27
5	3,25	2,9	31,60	- 1,70	- 1,82	1,00	1,00	2,79	2,81

TABLEAU I

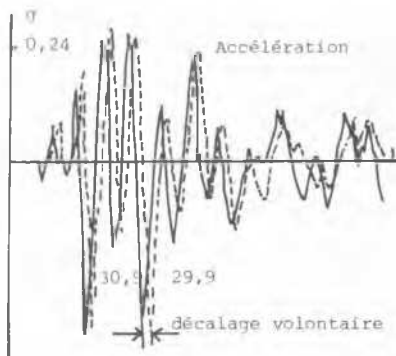


Figure 10 - Répétitions

REFERENCES

- [1] Habib, P. et Zelikson, A., Modèles réduits en dynamique.
- [2] Habib, P. et Luong, M.P., Comportement du milieu pulvérulent. Prise en compte de l'action sismique sur les sols.
- [3] Zelikson, A. et Habib, P., Simulation de l'interaction Sol-Structure en dynamique. Chapitres dans Génie Parasismique (1984), Direction V. Davidovici, Ed. E.N.P.C. Paris.
- [4] Zelikson, A., Devaure B. et Badel D., Scale modelling of Soil Structure Interaction during Earthquakes using a programmed series of Explosions during centrifugation. Int. Conf. E.Q. Engng St Louis U.S.A. 1981.
- [5] Zelikson, A., LEGUAY, P. et Pascal, C., Centrifugal model analysis of pile and raft foundation subject to Earthquakes. Int. Jour. Soil Dynamics & E.Q. Engng 1983, vol.2 n° 4.

ras de la fondation, car l'amortissement massique du sol et le nombre infini de degrés de liberté qu'il représente ne permettent pas de le remplacer par des modes propres. Par contre, la superstructure fixée sur banc en laboratoire a été analysée avec une grande précision et ses modes propres extraites expérimentalement dans la gamme de fréquence intéressante établie par des essais sur centrifugeuse du modèle complet. La figure 8 donne comme exemple les réactions verticales des groupes de pieux. Le tableau I donne tous les paramètres nécessaires pour reconstituer la structure à partir de ces modes. En parallèle, un groupe de 4 pieux a été testé en centrifugation excité par un moteur électrique et un balourd, afin de déterminer les 4 composantes de la matrice de rigidité dynamique (calculé par intervalle de 0,3 Hz). La combinaison de l'ensemble est faite par un code de calcul de "blocs" dynamiques.

L'extraction des modes propres de l'ensemble sur centrifugeuse n'a donné que deux des modes déterminés plus haut. Ils sont comparés sur la fig. 9 aux modes de la superstructure. Une animation des vibrations de la superstructure et de l'ensemble a été faite en utilisant l'ordinateur. Elle a été basée sur les modes propres.

La figure 10 montre la répétitivité des essais de simulation pour des mouvements de la structure. En conclusion, la simulation sismique qui a été décrite est capable de donner des images répétitives semblables à la réalité pour les principaux aspects.